

# USURE DES OUTILS DE COUPE

Sujet de TP

## Objet

Le but de ce TP est la compréhension de l'usinage dans l'optique d'une optimisation des paramètres de coupe pour la production. Une opération d'ébauche et les phénomènes d'usure associés seront particulièrement étudiés.

## Fournitures

- Document ressource, Sujet de TP
- Tour Somab *Transmab* T400
  - o Rondin en XC 48, Plaquette Sandvik SNMG 120408-SR
- Appareils de mesure
- Classeur Excel, document réponse

## 1. Contexte

Dans le cadre d'une fabrication en très grande série d'un moyeu sur machine bi-broche (cf. Annexe 1), il est considéré la phase de préparation d'une pièce brute, cylindrique de révolution. Le brut initial est une barre cylindrique en xc48, de diamètre 50mm, et de longueur 3m. La phase de préparation inclut notamment deux opérations d'usinage :

- ❖ positionnement de la barre à la longueur ad-hoc dans un centre de tournage bi-broche à chargeur
- ❖ une opération de chariotage, sur une longueur de 120mm, pour atteindre un diamètre de 46mm,
- ❖ une opération de tronçonnage à longueur,
  - o reprise de la pièce sur la seconde broche pour les opérations de conformation.

L'opération de tronçonnage est déjà maîtrisée. On considérera un temps annexe de 23s, correspondant aux opérations de positionnement de la barre et de tronçonnage. La phase de reprise concerne la seconde broche de la machine et ne fait pas partie de cette étude.

Il est donc envisagé l'optimisation de la phase d'ébauche, à savoir la réalisation d'une éprouvette de  $\phi$  46mm pour une longueur de 120mm, à partir d'un diamètre de 50mm. Afin de limiter le nombre de référence d'outil dans le stock du magasin, la direction souhaite tester la plaquette Sandvik SNMG 120408-SR pour cette opération.

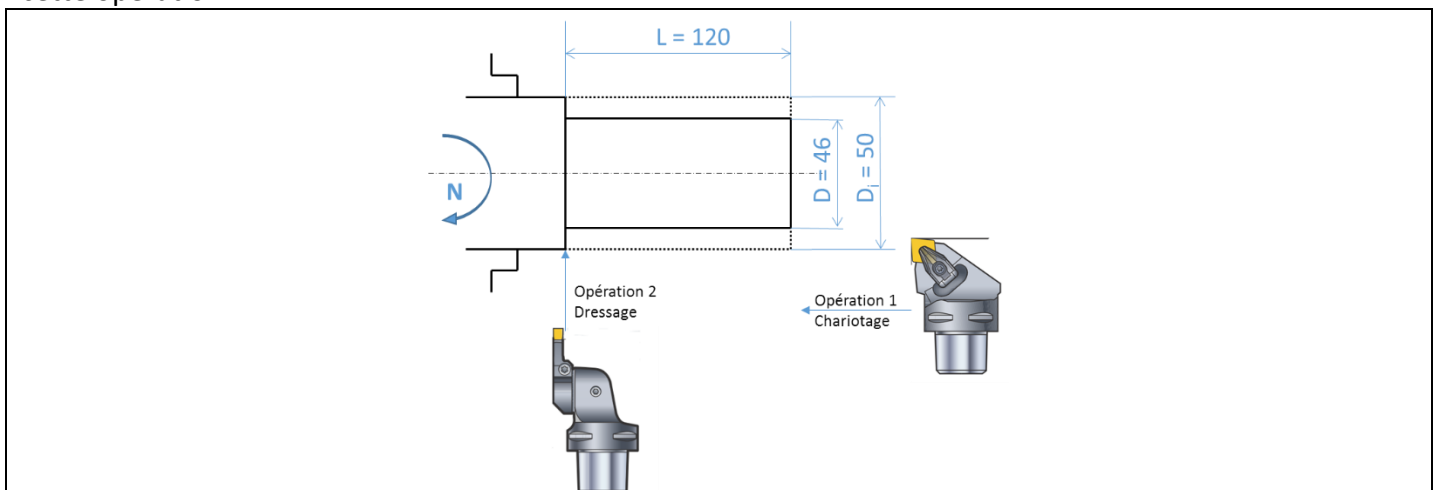


Figure 1 : Phase étudiée

## 2. Durée de vie de l'outil

Le comportement de l'outil envisagé lors de l'usinage du xc48 n'est pas connu de l'entreprise. Un plan d'expériences est donc réalisé pour connaître l'évolution de la durée de vie de l'outil en fonction des différents paramètres de coupe.

En considérant les paramètres de coupe [ $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ] comme étant indépendants, et en retenant trois niveaux pour chaque, un plan fractionnaire de type Taguchi  $L_9(3^3)$  est retenu. La majorité des essais a déjà été réalisée, et seul un dernier test doit encore être validé :  **$V_c = 160 \text{ m/min}$  ;  $f = 0.15 \text{ mm}$  ;  $a_p = 1 \text{ mm}$ .**

Le modèle de la loi de durée de vie recherchée est de type loi de Gilbert, dite loi de *Taylor généralisée*. Ce type de loi est linéaire dans le domaine logarithmique ; l'exploitation des données sera faite en ce sens.

*Prendre connaissance du classeur Excel et des annexe 2 et 3.*

*Réaliser l'essai manquant à l'aide du programme %101 sur le tour Transmab*

*Interpréter le plan d'expérience pour reconstruire les modèles de durée de vie.*

## 3. Optimisation de la phase d'ébauche

Les données économiques nécessaires à l'étude de cette phase sont les suivantes :

- Coût du porte-outil : 80€ (pour 100 plaquettes).
- Coût d'une plaquette SNMG120408-SR (8 arêtes utiles) : 10€
- Coût horaire du poste de travail : 200 €/h.
- Temps de changement d'arête : 20 s (changement et réglage).

Dans un premier temps, l'opération d'ébauche est envisagée en une seule passe, avec une profondeur  $a_p = 2 \text{ mm}$ .

*La loi d'usure ayant été générée lors de la partie précédente, réaliser la mise en donnée conformément aux éléments fournis. Déterminer les conditions de coupe optimales [ $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ] en coût et en production. Vérifier leur compatibilité.*

*Analyser l'influence des différentes données et conditions de coupe sur les coûts et la production.*

Les opérations réalisées sur la broche secondaire imposent un changement d'outils toutes les 14 pièces.

*Proposer une stratégie afin de coordonner au mieux les changements d'outils et de minimiser les interventions des opérateurs.*

## Annexe 1 : Tour bi-broche, bi-tourelle



Figure A1.1 : tour bi-broche, bi-tourelle, avec chargeurs de barre : nakamura TW20

Animation visible ici : <https://youtu.be/vyhhiglVpw0>

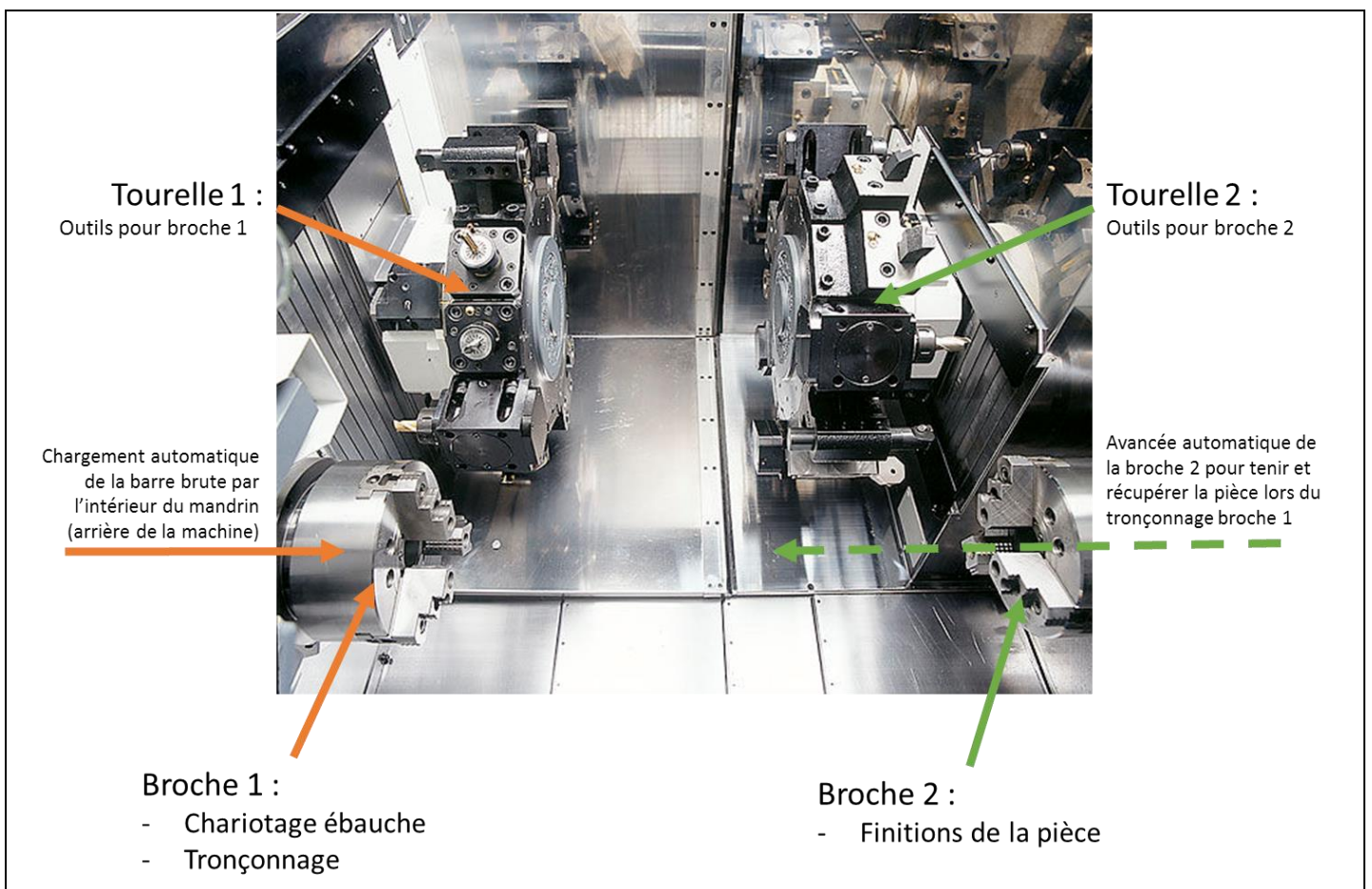


Figure A1.2 : intérieur du TW20 ; mise en œuvre possible de la fabrication de la pièce imaginaire du TP

## Annexe 2 : Réalisation d'un essai de durée de vie

### Matériel

Machine-outil : Tour à commande numérique 2 axes, SOMAB, (TRANSMAB 400), Puissance 25 kW.

Outil :

- Outil à charioter : angle de coupe  $\gamma = -5^\circ$ , angle de direction d'arête  $\kappa = 75^\circ$ .
- Plaquette carbure, non revêtue (COROMANT SNMG 12 04 08-QM H13 A)

**Matière usinée** : Rondins en acier XC48.

### Appareil de mesure :

Stéréomicroscope à zoom avec caméra CCD.  
Table micrométrique à mouvements croisés.

### Marche à suivre

- Identifier les paramètres de coupe de l'essai d'usure à réaliser.
- Sur la machine, mettre à jour le programme (%101) permettant de réaliser les essais (langage ISO. C'est un programme paramétré où il est nécessaire d'introduire, **seulement au début de la manipulation** :
  - les conditions de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ),
  - le diamètre de départ de la pièce ainsi que la zone à usiner (point de départ de la première passe),
  - un incrément du temps d'usinage.

Il est à noter que le rondin d'acier doit être usiné par passes successives, sans toutefois descendre en-dessous d'un diamètre de 70 mm. Cette limite permettant :

- de conserver une pièce de dimensions et de capacité calorifique suffisantes pour ne pas provoquer un accroissement trop important de la température au cours de l'essai, qui modifierait sensiblement le régime d'usure,
- d'assurer une rigidité convenable de la pièce.

- Démontez la plaquette, après chaque arrêt, observez la forme de l'usure frontale et mesurez la valeur moyenne  $V_B$  de celle-ci dans la zone B de la bande d'usure,

*NB : Maintenir approximativement constant le temps d'arrêt nécessaire entre chaque série de mesures, ou utiliser une soufflette pour refroidir complètement l'outil si plusieurs cycles d'usinage doivent être lancés avant démontage.*

- Noter toute variation sensible de l'état de surface en cours d'usinage ainsi que la forme du copeau.
- Tracer l'évolution de  $V_B$  en fonction du temps d'usinage (page Excel).

En accord avec les recommandations de la norme NF E 66-505, la durée de vie  $T$  de l'arête de coupe est déterminée par la valeur du temps d'usinage qui conduit à une usure en dépouille  $V_B$  de 0,3 mm.

- Déterminer alors la durée de vie de l'outil dans les conditions de coupe choisies.

## Annexe 3 : Exploitation du plan d'expérience

La méthode des plans d'expériences n'est pas une technique nouvelle, mais il a fallu attendre les travaux du Docteur TAGUCHI (1924-2012) au Japon pour qu'elle soit plus largement utilisée. Cette méthode permet une diminution souvent importante du nombre d'essais par rapport aux techniques traditionnelles de tâtonnements successifs.

### Méthode traditionnelle et plans complets

Supposons que l'on désire étudier l'influence des conditions cinématiques de l'usinage sur la durée de vie  $T$  des outils de coupe. Chacun des facteurs (vitesse de coupe  $V_c$  et avance  $f$ ) peut prendre plusieurs valeurs comprises entre un mini et un maxi.

La démarche traditionnelle consiste à étudier séparément les deux facteurs  $V_c$  et  $f$ . On fixe  $f$  à un niveau moyen et on détermine la valeur de la durée de vie de l'outil lorsque  $V_c$  varie de sa valeur mini à sa valeur maxi à l'aide de 5 expériences par exemple. On procède de même pour étudier l'influence de l'autre facteur  $f$  (figure A3.1).

Ces essais permettent de savoir comment agit  $V_c$  quand  $f$  est au niveau moyen, mais ne permettent pas de connaître son action quand  $f$  est au niveau mini ou maxi.

Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser un maillage du domaine de validité des deux facteurs  $V_c$  et  $f$  et d'exécuter un essai à chacun des nœuds du maillage ; il faut alors réaliser 25 expériences pour connaître la loi  $T(V_c, f)$ . Si l'on désire aussi étudier l'influence de la pénétration en prenant 5 valeurs pour ce nouveau facteur, il faudrait alors réaliser 125 essais, ceux-ci correspondant à un plan factoriel complet : pour  $k$  facteurs à  $n$  niveaux, le plan complet comporte  $n^k$  essais.

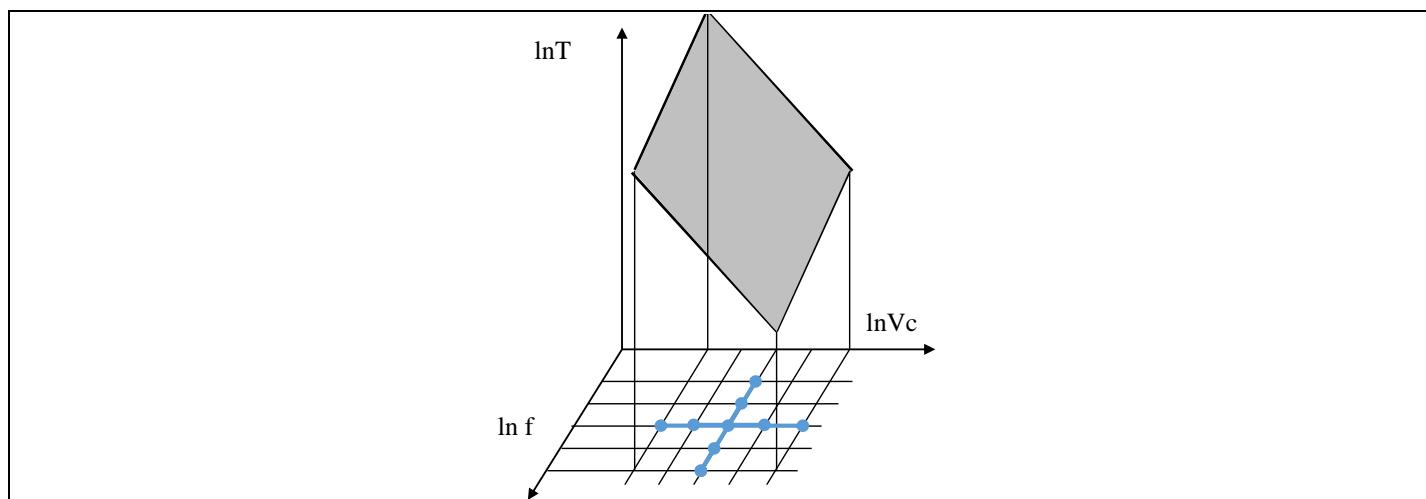


Fig.A3.1 : Durée d'outil en fonction de  $V_c$  et  $f$

### Les plans d'expériences fractionnaires.

Dans les plans factoriels complets, chaque nœud du maillage donne lieu à un essai, et le nombre d'essais peut très vite devenir incompatible avec les contraintes industrielles. La méthode des plans d'expériences fractionnaires permet de réduire de façon significative le nombre d'essais ; le principe consiste à n'étudier que certains points du maillage.

Ces plans doivent vérifier deux conditions :

- Première condition : Les essais retenus doivent être **orthogonaux** pour calculer les effets d'un facteur indépendamment des autres facteurs. Il y a orthogonalité si à chaque niveau d'un facteur, tous les niveaux des autres facteurs sont associés le même nombre de fois dans le plan d'expériences.

- Deuxième condition : Condition sur le nombre de **degrés de liberté**. C'est le nombre de valeurs qu'il est nécessaire de calculer pour connaître l'ensemble des coefficients du modèle ; il est donc nécessaire de faire au moins autant d'essais qu'il y a de degrés de liberté dans le modèle.

## Plan d'expérience retenu pour modéliser la durée de vie des outils

Le modèle de durée de vie visé est celui de Gilbert, soit :  $T = K a_p^{\ell} f^m V_c^n$

Les facteurs retenus pour cette étude sont les trois paramètres de coupe, à savoir  $[V_c, f, a_p]$ . On retiendra trois niveaux pour chacun de ces facteurs, ce qui permet d'utiliser la table de TAGUCHI  $L_9(3^3)$  (9 essais, 3 facteurs ( $V_c, f, a_p$ ) avec 3 niveaux (1, 2, 3)). Il est à remarquer qu'un plan complet nécessiterait 27 essais.

Table A3.1 : Table de Taguchi  $L_9(3^3)$

Essai N°	Plan partiel		
	$V_c$	$f$	$a_p$
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Cette table permet de vérifier les conditions minimales d'un plan fractionnaires, en particulier l'orthogonalité :

- Essais 1, 2, 3 : Lorsque  $V_c$  est au niveau 1,  $f$  est une fois aux niveaux 1, 2 et 3 et de même pour le facteur  $a_p$ .
- Essais 2, 5, 8 : Lorsque  $f$  est au niveau 2,  $V_c$  est une fois aux niveaux 1, 2, 3 et de même pour le facteur  $a_p$ .
- Etc.....

Le modèle de plan d'expérience associé à cette table d'essai est un modèle additif, basé sur les effets moyens de chacun des facteurs, supposés indépendants :

$$\text{Réponse}(V_c1, f1, a_p1) = \text{Moyenne\_générale} + \text{Effet}(a_p1) + \text{Effet}(f1) + \text{Effet}(V_c1)$$

Le modèle de durée de vie recherché étant un modèle exponentiel, le plan d'expérience sera analysé sur la partie logarithmique des données. En particulier, la réponse sera  $\ln(T)$ , et non pas simplement  $T$ . De cette sorte, le modèle de Gilbert sera vu comme :

$$\ln(T) = \ln(K) + \ell \ln(a_p) + m \ln(f) + n \ln(V_c)$$

### Calcul des effets moyens

Les effets moyens sont calculés par rapport à la moyenne générale des essais qui correspond au point central du domaine de validité des facteurs. Par exemple, l'effet moyen de l'avance au niveau 2 est obtenu par :

- $Ef2 = \text{moyenne des réponses pour } f \text{ au niveau } 2 - \text{moyenne générale}$
- $Ef2 = \text{moyenne} [\ln(T_{\text{essai } 2}) + \ln(T_{\text{essai } 5}) + \ln(T_{\text{essai } 8})] - \text{moyenne} (\ln(T_{\text{essais } 1 \rightarrow 9}))$

### Graphique des effets moyens

Le graphe des effets moyens est une représentation graphique des résultats du plan d'expériences (fig.A3.2). Le sens de variation indique si les facteurs agissent de façon positive ou négative sur la réponse ( $\ln(T)$ ), la pente permet d'identifier rapidement le facteur le plus influent.

Dans l'illustration, les 2 facteurs (Vc et f) ont des effets défavorables et le facteur Vc est le plus influent (pente la plus grande).

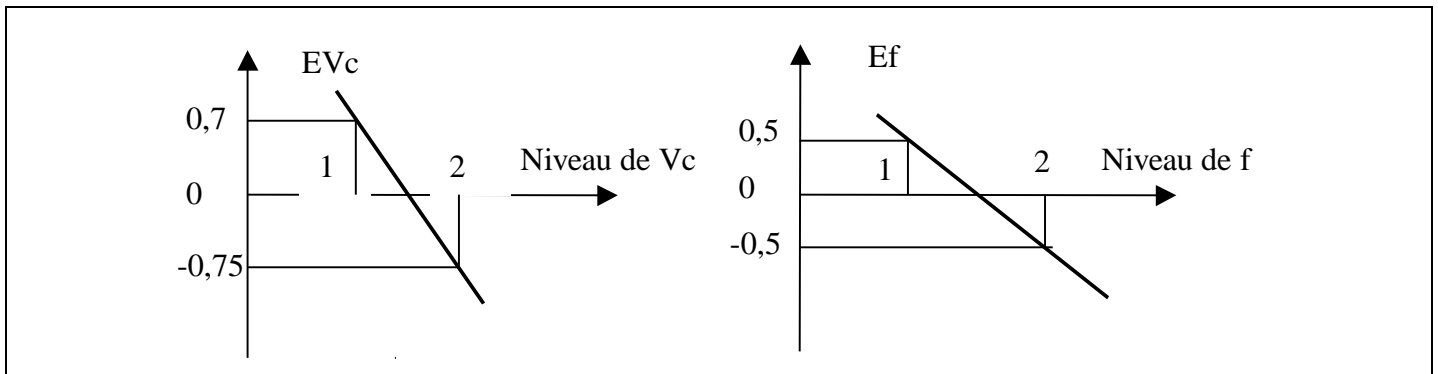


Figure A3.2 : Graphe des effets moyens

### Calcul de la durée d'outil théorique par les plans d'expériences

Connaissant les effets moyens des facteurs, il est alors facile de calculer la durée d'outil théorique, c'est-à-dire la durée que l'on devrait mesurer si celle-ci ne dépendait que des effets moyens des facteurs pris en compte.

Exemple : essai n°2 (Vc au niveau 1, f au niveau 2, a<sub>p</sub> au niveau 2)

$$\ln(T_{\text{théorique } 2}) = \text{moyenne}(\ln(T_{\text{essais } 1 \rightarrow 9})) + EVc1 + Ef2 + Ea_{p2}$$

Compte tenu des dispersions liées aux résultats des essais d'usure, et aux approximations du modèle de plan d'expérience choisi, il existe des écarts entre les valeurs mesurées et théoriques :

$$\begin{aligned} \ln(T_{\text{théorique } 2}) = & \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) \\ & + [\ln(T_{\text{essai } 1}) + \ln(T_{\text{essai } 2}) + \ln(T_{\text{essai } 3})] / 3 - \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) \\ & + [\ln(T_{\text{essai } 2}) + \ln(T_{\text{essai } 5}) + \ln(T_{\text{essai } 8})] / 3 - \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) \\ & + [\ln(T_{\text{essai } 2}) + \ln(T_{\text{essai } 4}) + \ln(T_{\text{essai } 9})] / 3 - \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln(T_{\text{théorique } 2}) = & \ln(T_{\text{essai } 2}) \\ & + [\ln(T_{\text{essai } 1}) + \ln(T_{\text{essai } 3}) + \ln(T_{\text{essai } 5}) + \ln(T_{\text{essai } 8}) + \ln(T_{\text{essai } 4}) + \ln(T_{\text{essai } 9})] / 3 \\ & - 2 \times \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) \end{aligned}$$

$$\ln(T_{\text{théorique } 2}) = \ln(T_{\text{essai } 2}) + 2 \times [\text{moyenne}(\ln(T_{1,3,4,5,8,9})) - \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9}))]$$

$$\ln(T_{\text{théorique } 2}) = \ln(T_{\text{essai } 2}) + \epsilon_2$$

L'inconvénient de cette méthode est la discrétisation des résultats admissibles sur les points d'essais retenus. Si un résultat est finalement souhaité entre deux valeurs du plan initial, il convient de réfléchir à une interpolation des résultats entre ces différentes valeurs (mais c'est pour ça que le plan s'attache aux valeurs logarithmiques).

### Détermination du modèle de durée de vie des outils de coupe

La démarche précédente a été établie dans le domaine logarithmique pour établir un parallèle entre le modèle brut issu du plan d'expérience et le modèle de Gilbert visé. Pour des paramètres d'usinage du plan d'expérience [Vc<sub>i</sub>, f<sub>j</sub>, a<sub>p</sub><sub>k</sub>], on a :

$$\begin{aligned} \ln(T_{\text{th}}) &= \text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) + EVc_i + Ef_j + Ea_{p k} \\ \ln(T_{\text{Gilbert}}) &= \ln(K) + n \ln(Vc_i) + m \ln(f_j) + \ell \ln(a_{p k}) \end{aligned}$$

(1)

L'interpolation linéaire des résultats du plan d'expérience dans un espace logarithmique permet donc de réaliser la transition depuis les résultats du plan d'expérience vers le modèle continu de durée de vie (non sans une petite perte de précision due à la fidélité de l'interpolation). Soit :

- $Ea_p \approx a_1 \ln(a_p) + b_1$
- $Ef \approx a_2 \ln(f) + b_2$
- $EVC \approx a_3 \ln(Vc) + b_3$

Et donc

- $\ln(T_{th}) \approx [\text{moyenne}(\ln(T_{1 \rightarrow 9})) + b_1 + b_2 + b_3] + a_1 \cdot \ln(a_p) + a_2 \cdot \ln(f) + a_3 \cdot \ln(Vc) = \ln(T_{\text{Gilbert}})$

Ainsi :

$$\ln(K) = \text{Moy} + b_1 + b_2 + b_3$$

$$\ell = a_1$$

$$m = a_2$$

$$n = a_3$$